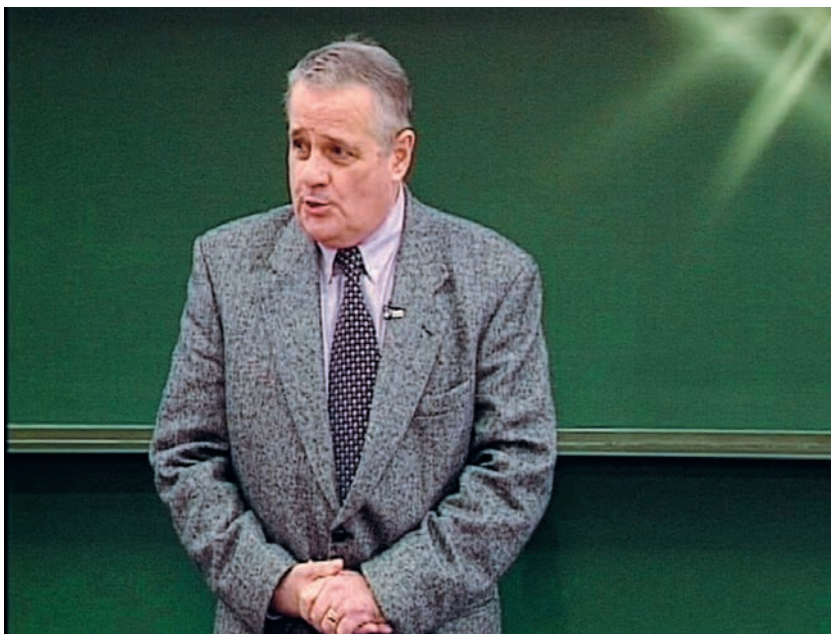


BENCZE GYULA

Félnünk kell-e a nukleáris energiától?



Bencze Gyula
fizikus
egyetemi tanár

1936-ban született. 1959-ben végzett az ELTE Természettudományi Karának fizikus szakán. 1969-ben a fizikai tudományok kandidátusa lett magfizikából, 1975-ben pedig akadémiai doktor a sokrészecske szóráselmélet terén elért eredményeivel.

Pályáját 1959-ben kezdte az Optikai Kutató Laboratórium-ban, majd a MOM Kutató Laboratórium-ban fizikai optikával foglalkozott. 1962-től a KFKI Magfizikai Laboratóriumában, később a KFKI Részecske és Magfizikai Kutatóintézetében dolgozott mint tudományos tanácsadó. 1980–1986 között az RMKI tudományos igazgató-helyettese volt. Több neves külföldi egyetemen tanított mint vendégprofesszor, 1995 óta a New Mexico Egyetem kinevezett fizikaprofesszora.

Főbb kutatási területei: a magreakciók elmélete és a sokrészecske szóráselmélet. Új egzakt integrálegyenleteket vezetett le az N-részecske tranzitoperátorokra minimális csatolás mellett (Bencze-egyenletek, 1973), valamint két amerikai munkatársával kidolgozta az azonos részecskék szó-rásának egzakt algebrai elméletét (1979–1982) mind a stacionárius, mind pedig az időfüggő formalizmus keretében.

Bevezetés – az energia

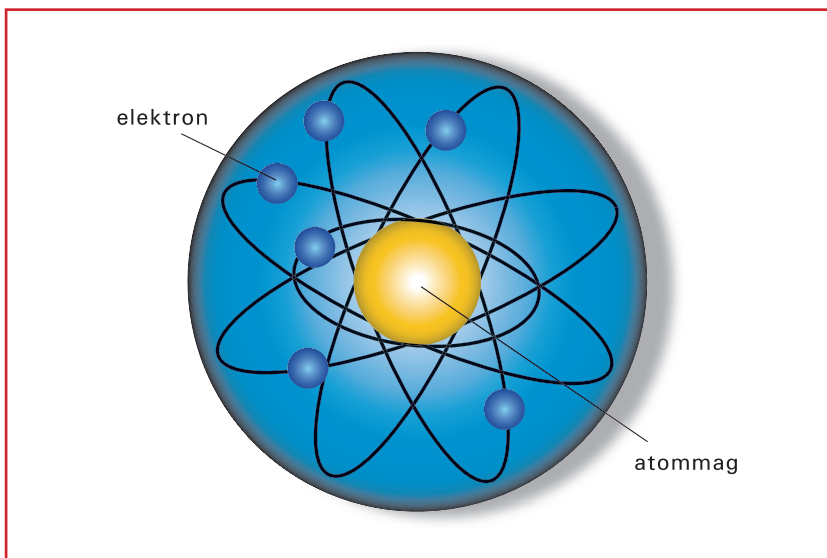
Mi az energia?

A hétköznapi beszéd fordulataiban gyakran szerepel az energia szó valamilyen kapcsolatban. A fiatalok energikusak, valaki nagy energiával lát neki a munkának vagy telve van energiával. A szóhasználat jelzi, hogy az emberek ösztönösen tudják, mi az energia, amelyben sajnos nem mindig bővelkedünk. A fizika pontosan fogalmaz: *Az energia anyagi rendszerek munkavégző képességének mértéke. SI-mértékegysége a joule (J).*

Az energia fajtái, egymásba való átalakulásuk, az energia megmaradásának elve

Az energiának számos ismert fajtája van, a mozgással a mozgási (kinetikus) energiát asszociáljuk; egy erőterben, mint például Földünk gravitációs erőtere, a test helyzetéből adódóan helyzeti energiával is rendelkezik. A mecha-

Az atom elektronburka és az atommag



Energia:

anyag rendszer munkavégző képességének mértéke, SI-mértékegysége a joule (J).

Atomenergia, nukleáris energia:

az atommagok átalakulása (atommag-reakció) során felszabaduló energia. Békés célokra technikailag megoldott az atommaghasadáson alapuló energiatermelés, míg a csillagok energiáját szolgáltató atommagfúzió jelenleg csak kísérleti körülmények között, illetve a hidrogénbombában valósítható meg.

Elektronvolt, eV:

az az energia, amelyet az elektron 1 volt potenciálkülönbségen való áthaladással nyer. A hagyományos energiaegységgel a magfizikában használatos millió elektronvolt (MeV) a következő kapcsolatban áll: $1 \text{ MeV} = 1,602 \cdot 10^{-6} \text{ erg}$.

nikai energián kívül a hővel is társítható **energia**, amelynek megnyilvánulási formáival a hétköznapiakban gyakran találkozunk. Közismert továbbá a kémiai, az elektromos és a mágneses energia, valamint legújabban a **nukleáris energia**.

A különböző energiafajták átalakulhatnak egymásba, az energia mennyisége azonban eközben semmiképpen nem növekedhet. Az energia megmaradásának elvét 1842-ben először Julius Robert Mayer mondta ki fizikai rendszerekre és biológiai jelenségekre. A tudomány fejlődése során aztán bebizonyosodott, hogy ez az elv jóval általánosabb érvényű, és valamennyi energiafajta fennáll.

A modern fizika, konkrétan Einstein ún. speciális relativitáselmélete ismerte fel a tömeg és az energia egyenértékűségének elvét, mely szerint a testek kölcsönhatásakor az energiaátadást mindig egy vele arányos tömegátadás kíséri. Más szavakkal megfogalmazva: a testek nyugalmi tömegéhez is tartozik energia, amelyet a sokat idézett Einstein-féle képlet: $E=mc^2$ határoz meg. Ez az elv egyesíti a tömeg és az energia megmaradásának elvét a legáltalánosabb keretek között.

Miben különbözik a nukleáris energia a többi energiafajtától?

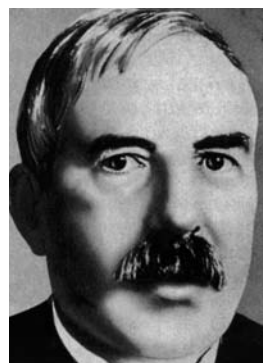
A nukleáris energiát **atomenergiaként** szokás magyarra fordítani, valójában azonban az atom magjában rejlő energiára gondolunk.

A természetben jelenlegi ismereteink szerint négy alapvető kölcsönhatás létezik: a gravitációs kölcsönhatás, az elektromágneses kölcsönhatás, a gyenge kölcsönhatás, valamint az erős – vagy nukleáris – kölcsönhatás. Ez a felsorolás egyben erősségük sorrendjét is jelzi. A hagyományos, a hétköznapiakból ismert mechanikai energia lényegében a gravitációval társítható.

Az atomok és molekulák szerkezetét, amiben a kémiai energia forrása rejlik, alapvetően az elektromágneses kölcsönhatás (a töltések között ható

Coulomb-erő) szabja meg. A kémiai energia tehát lényegében az elektromágneses kölcsönhatás megnyilvánulása (ide sorolhatók az emberi testben lezajló fontos biokémiai folyamatok, amelyek az életünk fenntartásához szükséges energiát szolgáltatják).

A nukleáris energiát annak mértéke különbözteti meg a többi energiafajtától, mivel felszabadítása minden eddigienél látványosabb és pusztítóbb hatásokat képes elérni. Az atomi és nukleáris kölcsönhatás között 5–6 nagyságrend különbség van. Az atomok mérete átlagosan 10^{-8} cm, a centiméter százmilliomod része, míg az atommag sugara ennél százezerszer, egymilliószor kisebb. Az atomokban a külső elektronok kötési energiája néhány, esetleg 10 **elektronvolt** (eV), míg az atommagoknál ez az érték millió elektronvoltokban (MeV) mérhető. Ez az 5–6 nagyságrend a hatást tekintve alapos különbséget jelent. Egyes tankönyvek azzal a példával szokták ezt illusztrálni, hogy 1 kg uránium-235 hasadásakor 18,7 millió kilowattóra energia szabadul fel hő alakjában. Ha a hagyományos energiaforrásokat vesszük alapul, az összehasonlítás valóban ijesztő.



Rutherford, Sir Ernest
(1871–1937)

Az atommag mint a nukleáris energia forrása

Az atommagok szerkezete és alkotórészeinek alapvető kölcsönhatásai

Az atommagok fizikája a múlt század első negyedében született meg, amikor 1911-ben Rutherford kísérletekkel igazolta az atommag létezését, illetve amikor 1919-ben létrehozta az első mesterséges magreakciót. Az elméleti atommagfizika tudományáról pedig lényegében 1932-től beszélhetünk, amikor Heisenberg egy úttörő cikkében az atommagok szerkezetének leírására a kvantummechanikát alkalmazta.

Az atommagok pozitív töltésű protonokból és semleges neutronokból állnak, amelyeket egységesen nukleonoknak szoktak nevezni. A nukleonok között erősen vonzó magerők hatnak – ezeket szokás erős kölcsönhatásnak is nevezni. A nukleonok között fellép még egy ún. gyenge kölcsönhatás is, amely lényegében a protonok és neutronok közti átalakulásokért és a radioaktivitás egyes fajtáiért felelős. A pozitív töltésű protonok között természetesen hat a taszító Coulomb-kölcsönhatás is. Míg az erős és gyenge kölcsönhatás rövid hatótávolságú, a Coulomb-kölcsönhatás a távolság négyzetével fordítottan arányosan csökken, tehát valójában hatótávolsága végtelen.

Az atommagok alapvető jellemzői az erős, a gyenge és az elektromágneses kölcsönhatás tulajdonságainak ismeretében nagy pontossággal leírhatók – nincs szükségünk a nukleonok már jól ismert belső szerkezetének figyelembevételére.

Az atommagban levő protonok Z száma – az atommag töltésszáma (rendszáma) –, valamint a neutronok N száma szabja meg az atommag



Heisenberg, Werner (Karl)
(1901–1976)



Mágikus számok:

az atommagok héjmodellje szerint az atommagban a nukleonok héjakba rendeződnek, az egyes héjakban 2, 8, 20, 28, 50, 82, illetve 126 nukleon – proton vagy neutron helyezhető el. A telített héjakat tartalmazó ún. mágikus magokra különleges stabilitás jellemző.

Héjmodell (az atommagok héjmodellje):

A német Hans Daniel Jensen (1907–1973) és a német származású amerikai Maria Göppert-Mayer (1907–1972) fizikus 1949-ben egymástól függetlenül dolgozta ki az atommagok héjmodelljét, amelynek alapfeltevése szerint a nukleonok (külön-külön a protonok és a neutronok) a kölcsönhatásuk által létrehozott átlagtérben héjakba rendeződve helyezkednek el. Bizonyítékot találtak arra, hogy az ún. mágikus számú proton, illetve neutron tartalmazó atommagok különösen stabilak, és ezek a számok éppen az egyes héjakban található helyek számát határozzák meg. 1955-ben közösen írták meg *Az atommagok héjszerkezetének elemi elmélete* c. monográfiájukat, amelyben lefektetik modelljük elméleti alapjait. Munkásságukért 1963-ban megosztott fizikai Nobel-díjat kaptak.

$A = N + Z$ tömegszámát. Az azonos töltésszámú, de különböző tömegszámú atommagokat izotópoknak szokás nevezni, a körülöttük felépülő elektronburok által létrehozott atomok kémiai tulajdonságai azonosak.

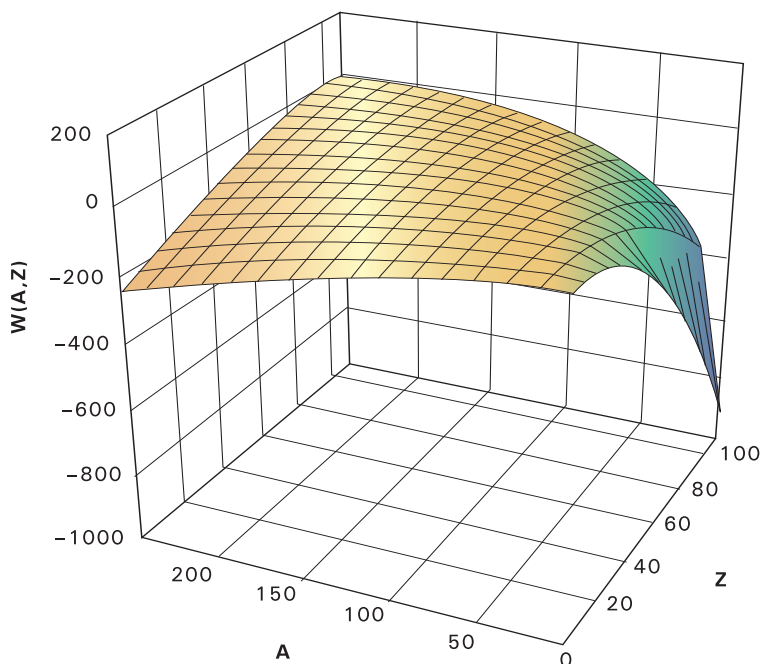
Az atommagfizikában használatos energiaegység az elektronvolt egymilliószorosa, rövidítése MeV; ez akkora energiának felel meg, amelyet egymillió voltos feszültségkülönbség befutásakor nyer az elektron. Az atommagok jellemző méretei a Fermi tiszteletére elnevezett fermi= 10^{-13} cm egységekben adhatók meg, és ez is a jellemző méret. Az Einstein-féle $E = mc^2$ relációt felhasználva a magfizikában a tömegeket MeV egységekben is szokás megadni. Ennek megfelelően az atommag két alapvető építőkövének, a neutronnak és a protonnak a tömege energiaegységekben rendre: $m_n = 939,55$ MeV, $m_p = 938,26$ MeV.

Az atommagok kísérletileg meghatározható tömege kisebb, mint a benne lévő protonok és neutronok együttes tömege. A kettő különbsége az ún. *tömegdefektus*. Einstein híres egyenlete alapján a tömegdefektust c^2 -tel szorozva megkapjuk az atommag kötési energiáját:

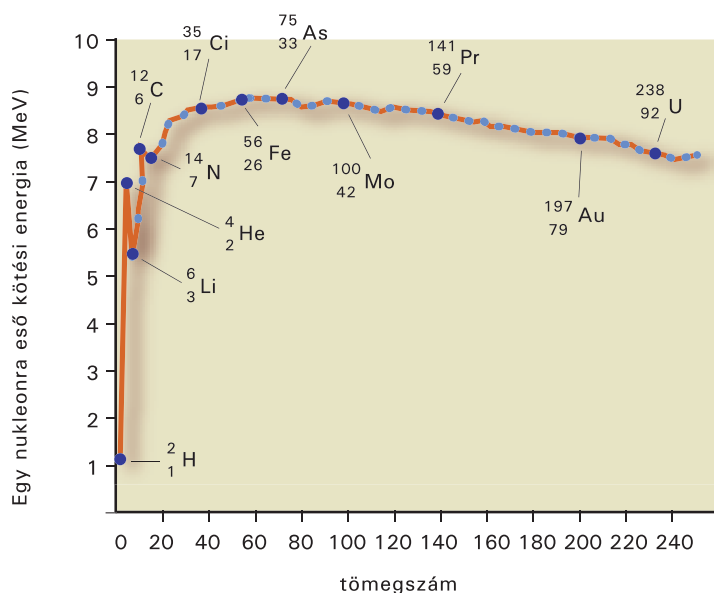
$$W(Z, A) = [Z \cdot m_p + N \cdot m_n - M(Z, N)] \cdot c^2$$

amely tehát mérésekkel meghatározható.

A későbbiekben kiderült, hogy bizonyos proton- és neutronszámoknál (az ún. **mágikus számok**nál: 2, 8, 28, 50, 82, 126) különösen stabilak az atommagok. Ezen a megfigyelésen alapul az **atommag „héjmodellje”**. A különféle modellek tulajdonságainak, valamint a kísérleti eredményeknek az egybevetésével született meg az atommagok félempirikus kötési



Az atommagok kötési energiája
A és Z függvényében



Egy nukleonra jutó kötési energia az A függvényében

energiaformulája, amely elsősorban C. F. von Weizsäcker nevéhez fűződik, és az atommag $W(A, Z)$ kötési energiáját az A tömegszám és a Z töltésszám függvényeként elméleti megfontolásokkal határozza meg. Az így megszerkesztett egyenletben szereplő szabad paramétereket a kísérleti eredményekhez való illesztéssel határozzák meg. Innen ered a *félempirikus* jelző.

Az atommagok tulajdonságairól jó áttekintést ad egyrészt a kötési energiafelület $W(A, Z)$, valamint az egy nukleonra jutó kötési energia függése az atommag tömegszámától. Látható, hogy a kötési energia nem növekszik határtalanul, hanem *telítésbe megy* – ami a magerők rövid hatótávolságának a következménye. A legstabilabbak az $A = 60$ körüli tömegszámú atommagok, például a vas, míg a kötési energia csökken mind az alacsonyabb, mind pedig a magasabb tömegek tartományában. Ebből azonnal kiolvasható, hogy mind a nehéz magok hasadása, mind pedig a könnyű magok fúziója (nukleáris) energiát szabadíthat fel. A 266 stabil atommag mellett ma már több mint 500 radioaktív izotópot ismerünk, és ez a szám egyre növekszik a kísérleti technika rohamos fejlődésével.

A maghasadás fizikája

A neutron és az atommagok erős kölcsönhatásának tanulmányozása során Enrico Fermi és munkatársai 1934-től egy sor radioaktív elem keletkezését regisztrálták. Hasonló kísérleteket végzett Párizsban Irene Curie és Pavle Savic. Otto Hahn, Fritz Strassmann és Lise Meitner Berlinben már 1937-ben legalább kilenc radioaktív termék jelenlétét bizonyította, a gond ezeknek a reakciótermékeknek az azonosítása volt. A két kémikusnak, Hahn-nak és Strassmann-nak sikerült a termékek között a báriumot azonosítani, amiről 1939 januárjában számoltak be a *Naturwissenschaft* című folyóirat-

Hahn, Otto:

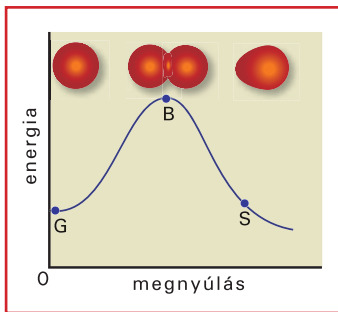
német fizikai kémikus (1879–1968). 1918-ban munkatársával, Lise Meitnerrel felfedezte a protaktínium nevű elemet. 1938-ban Fritz Strassmann-nal bebizonyította, hogy a maghasadásnál az atommag neutronok kibocsátása mellett két fragmentumra hasad szét. A maghasadás folyamatának azonosításáért 1944-ben kémiai Nobel-díjat kapott.

Meitner, Lise:

osztrák fizikai kémikus (1878–1968), aki Otto Hahnnal 1918-ban felfedezte a protaktínium nevű elemet. Zsidó származása miatt 1938-ban Svédországba emigrált, ahol a stockholmi egyetemen folytatta kutatásait. Tőle származik az „atommaghasadás” kifejezés. Tiszteletére róla nevezték el a 109 rendszámú elemet meitneriumnak (Mt).

Kritikus tömeg:

a hasadóanyag legkisebb tömege, amelynél az önfenntartó láncreakció beindulhat; például az uránium-235-nél a kritikus tömeg 15 kg, a plutóniumnál 5,6 kg.



A hasadási potenciálgát

ban. Néhány héttel később ezt követte a *Nature* hasábjain az időközben Svédországba, illetve Angliába emigrált Lise Meitner és unokaöccse, Otto Frisch cikke, amelyben szintén az uránium szétbomlásával foglalkoztak. A *maghasadás* elnevezés valójában Lise Meitnertől és unokaöccsétől ered. Ennek az újfajta magreakciónak – magátalakulásnak – az azonosítása azonban alapvetően Otto Hahn és munkatársa, Fritz Strassmann érdeme.

A maghasadásnál tehát az atommag két nehéz fragmentumra hasad szét, amelyek radioaktívak – ezért tovább bomlanak –, valamint további neutronok is keletkeznek. A részletes számítások azt mutatják, hogy az atommag alakja gerjesztésekor megnyúlik, amihez energiára van szükség – más szavakkal: az atommag egy bizonyos mértékig „ellenáll”, ahogy ezt egy másfajta rugalmas közeg is teszi. Ez az ellenállás azonban egyszer csak megszűnik, és a mag széthasadásának nincs többé akadálya.

Egy atommag hasadása csak egy folyamat első lépése, ugyanis a hasadási termékek tovább bomlanak. A hasadási termékek radioaktív bomlással további magokká alakulnak, azok esetleg magasan gerjesztett állapotban

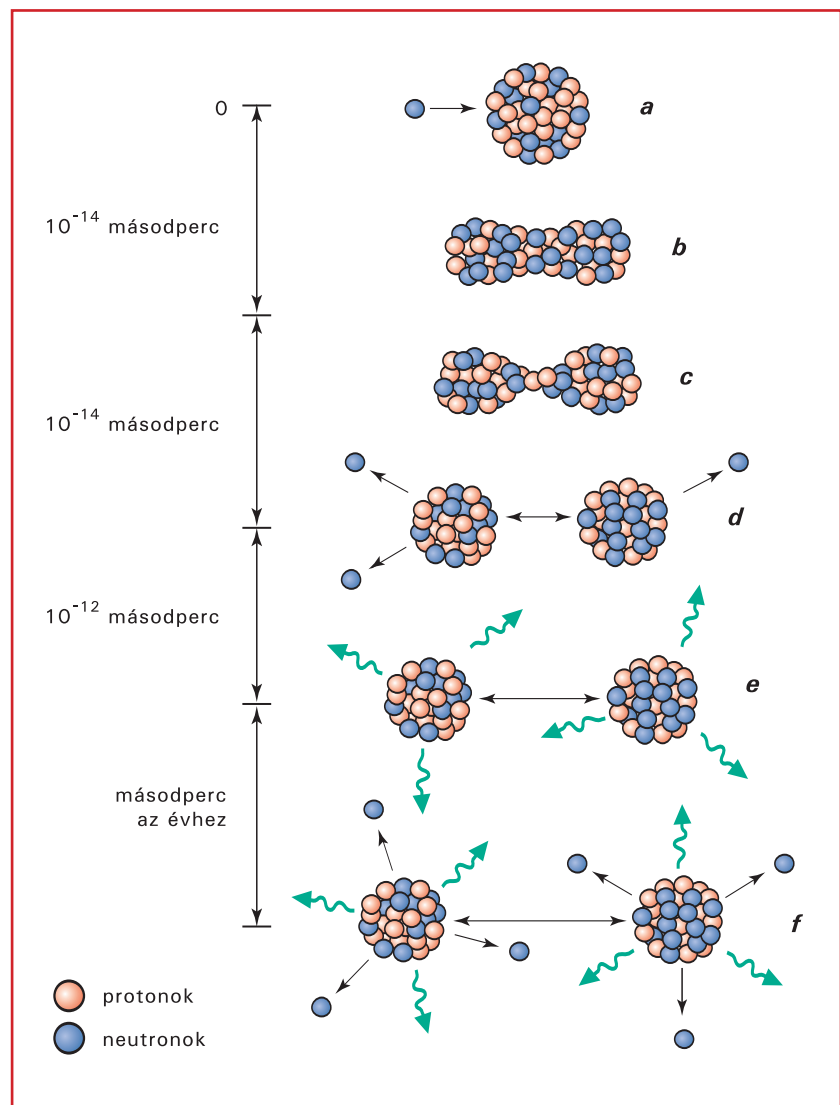
A hasadási reakciólánc

Késő-neutronok:

a hasadási termékek további radioaktív bomlása során kibocsátott neutronok, amelyek az őket létrehozó bomlási folyamat átlagos élettartamával később keletkeznek a hasadási neutronoknál.

Alfa-részecske:

a hélium-4 atommagja, radioaktív bomlásnál keletkezik, ebből áll az ún. alfa-sugárzás.



képződnek, és egy neutron kibocsátásával szabadulnak meg fölös energiájuktól. Az így keletkezett neutronokat **késő neutronoknak** nevezik, ugyanis a hasadást követően annyi idővel később jelennek meg, mint az őket kibocsátó atommagokat létrehozó béta-bomló magállapot átlagos élettartama.

A hasadási láncreakció

A láncreakció fogalma a kémiában már régen ismeretes. Alapvető és szükséges tulajdonsága, hogy a reakciót létrehozó egyik alkotóelemnek a reakció során újra kell termelődnie, így az újabb reakció kiváltására lesz képes. Ha ezek a reakciók elég gyorsan követik egymást, gyakorlatilag egy időben zajlanak le, megfelelő anyagmennyiség esetén jelentős energia szabadulhat fel.

A nukleáris láncreakció gondolatát először Szilárd Leó vetette fel Londonban, és a nukleáris láncreakcióra vonatkozó elképzelését 1936-ban szabadalmaztatta is. Szilárd ötletének alapja a ${}^9\text{Be}(n, 2n) 2\ {}^4\text{He}$ reakció volt. A négy protont tartalmazó berillium atommagnak csak a 9-es tömegszámú izotópja stabil. A 8-as tömegszámú izotóp, amelynek átlagos élettartama 10^{-16} másodperc, ami magfizikai skálán ugyan nem annyira rövid, a gyakorlatban azonban azonnal szétesik két **alfa-részecskére** – két hélium-4 atommagra. A reakciót kiváltó neutron a berilliumból kilök egy neutron, a maradék mag felbomlik, a neutron pedig újratermelődik. Megvannak tehát a láncreakciónak az alapfeltételei. A gyakorlatban azonban ez az ötlet nem vált be, a folyamat nem önfenntartó.

Szilárd Leó és Walter Henry Zinn mérte meg elsőként az uránium-235 hasadásánál keletkező másodlagos neutronok átlagos számát – azokét a neutronokét, amelyek az elsődleges hasadás mellett azonnal keletkeznek. Az eredmény 2,3 neutron hasadásonként, 0,3 neutronnyi alsó és felső hibahatárral, vagyis az önfenntartó láncreakció megvalósításának megvannak a fizikai feltételei. Az események további menete mindenki számára jól ismert. Szilárd Leó, Wigner Jenő és Teller Ede látogatást tett Princetonban Einsteinnál, és meggyőzte, fel kell hívnia az Egyesült Államok elnökének figyelmét annak veszélyére, hogy a németek atombombát állíthatnak elő. A küldetés sikerrel járt, Einstein megírta híres levelét Rooseveltnak, aminek nyomán beindult az amerikai atomprogram.

Chicagóban Enrico Fermi vezetésével összeállt egy csapat, amelynek tagja volt Szilárd Leó és Wigner Jenő is. 1942. december 2-án a láncreakció önfenntartóvá vált, így Chicagóban beindult a világ első nukleáris reaktora, amely a CP1 (Chicago Pile 1) nevet viselte – innen ered a korabeli *atom-máglya* kifejezés. A reaktorban Wigner Jenő tanácsára grafitmoderátort használtak. Feltétlenül említést érdemel még, hogy a háború után Fermi és Szilárd Leó szabadalmat kapott az atomreaktorra.

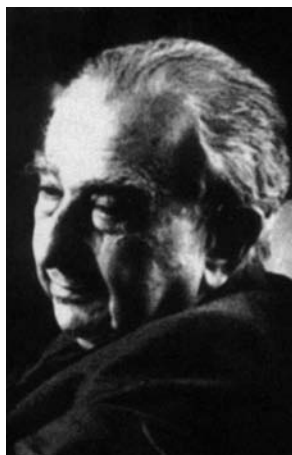
Az első siker után az erőfeszítések az atombomba előállítására összpontosultak, ami alapvetően másfajta feladat, mint egy atomreaktor létrehozása. A bombánál a cél a neutronsokszorozási tényező minél magasabb értéken való tartása, hogy a láncreakció lefutása igen gyors legyen.



Szilárd Leó (1898–1964)



Wigner Jenő (1902–1995)



Teller Ede (1908–2003)

A maghasadás kutatásának magyar úttörői

Új tudományterületek: reaktorfizika és nukleáris technológia

Az új tudományterületek feladatai

A maghasadás fizikájáról kimondhatjuk, hogy nagyjában-egészében megértjük az alapvető fizikai folyamatokat. Bár még bizonyára vannak tudásunkban hézagok, drámaian új fejleményre nem számítunk. Ezzel szemben a reaktorok fizikája és a berendezések konstrukciója terén még nyitottak a lehetőségek.

A reaktorfizika három alapvető feladata:

- › a reaktor adott összetétele mellett meghatározni a rendszerben a neutronok térbeli, időbeli, valamint sebességeloszlását;
- › nyomon követni a reaktorban lejátszódó magreakciókat, vagyis megadni a reaktor összetételének a változását: a hasadóanyag fogyasztását, a plutónium és a hasadási termékek felhalmozódását stb., szakkifejezéssel élve: ellenőrizni a reaktor-üzemanyag „kiegését”;
- › módszereket kidolgozni a reaktor üzemvitele szempontjából fontos mennyiségek mérésére.

A felsorolt feladatok matematikai alapját a transzport-egyenlet (Boltzmann-egyenlet) képezi, amelynek megoldása a legnagyobb erőfeszítéseket és hatalmas számítástechnikai kapacitást igényel. A reaktorok tervezésével kapcsolatos mérnöki munka ugyancsak nagyfokú kreativitást, új ötleteket kíván meg, amelyeket azonban *biztonsági okokból csupán az ellenőrző reaktorfizikai számítások után szabad a gyakorlatba átvinni.*



Boltzmann, Ludwig E.
(1844–1906)

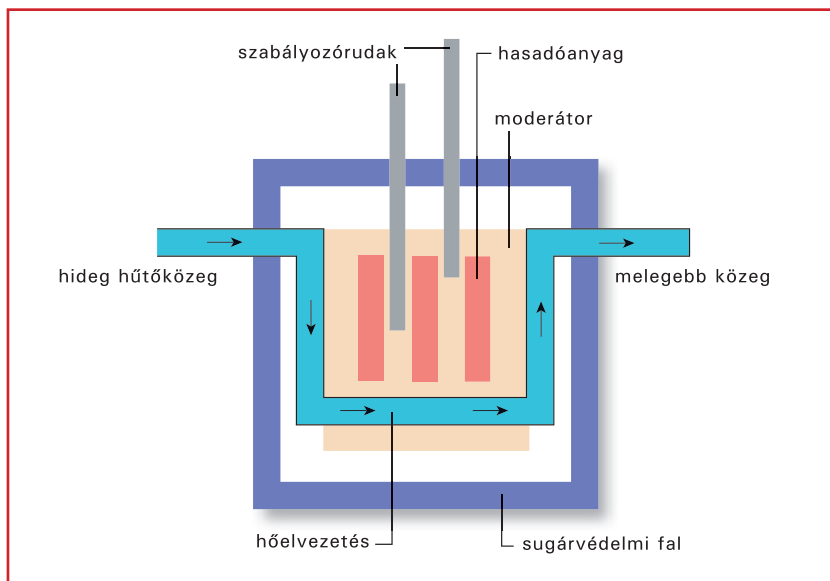
Az atomreaktorok alapvető szerkezeti elemei



A BME oktatóreaktorának épülete

A szabályozott láncreakció legfontosabb tulajdonsága, hogy nem gyorsan megy végbe, hanem az általunk megszabott ütemben és energiatermelési feltételek mellett. Az elrendezés legfontosabb tulajdonsága az effektív neutronszorozási tényező (k), amelynek értéke megszabja a rendszer viselkedését. Ha $k = 1$, akkor a rendszer stacionárius (kritikus), állandó energiatermelés folyik, ha $k < 1$, akkor a rendszer szubkritikus, a láncreakció leáll, míg $k > 1$ esetben a folyamat felgyorsul – ezt a lehetőséget kell a reaktorok tervezésénél minden eszközzel kizárni.

A láncreakcióhoz természetesen hasadóanyagra van szükség, amely az elrendezésben rudak alakjában helyezkedik el. A hasadásnál keletkező neutronok lassítására szolgál a moderátor, aminek az a feladata, hogy lelassítsa a gyorsneutronokat, így azok a sokszori ütközések révén sokkal nagyobb valószínűséggel képesek hasadást létrehozni. Az üzemanyagban felszabaduló hőt a hűtőközeggel vezetik el és villamos energiává alakítják.



Az atomreaktor általános sémája

A reaktorok típusai

Zéró reaktorok

Ezek a kritikus rendszerek gyakorlatilag nem termelnek energiát, hűtésre nincs szükség, és a működésnél sugárveszély sem lép fel. Elsődleges céljuk reaktorfizikai vizsgálatok végzése, és az elméleti modellek alkalmazhatóságának ellenőrzése mérésekkel.

A KFKI 1990-ig működő ZR-6 kritikus rendszerével végzett kutatások az elmúlt évtizedekben nagymértékben hozzájárultak a hazai atomenergetika fejlődéséhez, és ahhoz, hogy a Paksi Atomerőmű működtetéséhez és fejlesztéséhez megfelelő tudás és szakembergárda álljon rendelkezésre.

Kutatóreaktorok

A **kutatóreaktorok** kettős célt szolgálnak: oktatásra használják őket, valamint neutronforrásként funkcionálnak egyéb tudományterületek, például az anyagtudomány számára. Hazánkban két kutatóreaktor működik, a BME Nukleáris Technológiai Intézetében egy tanreaktor, amelynek az oktatásban van nagy jelentősége, valamint a KFKI–AEKI 10 MW teljesítményű reaktora, amely az anyagtudományi és szilárdtestfizikai kutatásokban játszik fontos szerepet, és a Budapest Neutron Center keretében külföldi felhasználóknak is rendelkezésére áll.

Atomerőművek

Az atomerőművek tervezésénél sok szempontot kell figyelembe venni, köztük a gazdaságosságot, a viszonylag egyszerű konstrukciót és a biztonságot. Az egyes típusok így az üzemanyag tulajdonságaiban, a moderátor anyagában és a hűtés módjában különböznek egymástól.

Kutatóreaktorok:

a kutatóreaktorok kettős célt szolgálnak, oktatásra használják őket, valamint neutronforrásként funkcionálnak egyéb tudományterületek, például az anyagtudomány számára. A kutatóreaktor köpenyét megfúrva a reaktor magjáig csatornák alakíthatók ki, amelyekben keresztül a hasadáskor keletkező neutronok eltávolíthatnak. Egy kutatóreaktornál több csatorna is létezik, így egyidejűleg többféle mérés is végezhető. A kijövő neutronok sebességét (energiáját) megfelelő szelektorokkal lehet kiválasztani. Igen fontos megjegyezni, hogy ilyen csatornákat csak kutatóreaktoroknál lehet létrehozni a kis teljesítmény miatt.



A KFKI kutatóreaktora

Forralóvízes reaktor:

a forralóvízes reaktorban mind a moderátor, mind a hűtőközeg könnyűvíz. A forralóvízesreaktor előnye, hogy – mivel a legegyszerűbb elvi felépítésű típus – a beruházási költségek viszonylag alacsonyak. A világon ma működő atomreaktorok összteljesítményének 22,5 százalékát adják a forralóvízes reaktorok.

A világon a legelterjedtebb az ún. nyomottvízes reaktor, amelynek moderátora és hűtőközege egyaránt a könnyűvíz (H_2O), amely nagy nyomás alatt még több száz fokon sem forr fel. A nyomottvízes a legelterjedtebb reaktortípus: ezek a világon jelenleg üzemelő atomreaktorok összteljesítményének mintegy 63,8 százalékát adják. Ilyen a Pakson működő VVER-440 típusú reaktor mindegyik blokkja.

A reaktorok egy másik típusa a **forralóvízes reaktor**, amelyben mind a moderátor, mind a hűtőközeg szintén könnyűvíz. A konstrukció megengedi azonban, hogy a reaktortartályban a víz egy része elforrjon, így az aktív zónából víz–gőz keverék lép ki. A termelt gőz közvetlenül a turbinára kerül, ezért a vizet és a gőzt szét kell választani (a gőzben lévő vízcseppek károsítják a turbinát). Mivel a reaktorban megengedett a víz elforrása, a nyomás kisebb, mint a **nyomottvízes reaktorok**nál: kb. 60–70 bar. Az üzemanyag többnyire urán-oxid. A friss üzemanyag dúsítása általában kisebb, mint a nyomottvízes típusnál. Hatásfokuk 33–35%. A világon ma működő atomreaktorok összteljesítményének 22,5 százalékát adják a forralóvízes reaktorok.

Az erőművi reaktorok egy része nehézvizet (D_2O) használ moderátornak és hűtőközegnek egyaránt. Ennek a típusnak az a hátránya, hogy a nehézvíz igen drága. Ugyanakkor a nehézvíz a legjobb moderátoranyag, és csak kis mértékben nyeli el a neutronokat, nem akadályozva ezzel a láncreakciót. Ezért itt az üzemanyag csak alig (1–2 százalékra) dúsított vagy akár természetes urán is lehet. A nehézvízes típus fő képviselője a kanadai CANDU-reaktor, amelyet azért fejlesztettek ki, hogy a költséges urániumdúsításra ne legyen szükség. A **nehézvízes reaktorok** a világ mai atomerőmű-összteljesítményének 5,3 százalékát adják, az építés alatt levőknek pedig 13,2 százalékát, tehát erősen elterjedően vannak.

Az előzőekben ismertetett reaktortípusokban (ezek az ún. termikus reaktorok) a hasadások döntő többségét az U-235 képviseli, az U-238 csak kismértékben járul hozzá az energiatermeléshez. Az U-238 magja azonban egy neutron befogásával több lépcsőben Pu-239-cé alakulhat. A Pu-239 hasadóképes, leghatékonyabban a **gyors neutronok** hasítják. A tenyésztő-reaktorokban mindkét folyamatot kihasználják. Ennél a típusnál nincs szükség moderátorra, a hűtést pedig folyékony alkáli fémrel biztosítják. A gyors (gyors neutronokkal működő) tenyészreaktorok a világ atomerőművi összkapacitásának kevesebb mint 1 százalékát adják. 1994 óta ilyen reaktort az Egyesült Államokban nem állítottak üzembe.

A fentiekben kívül még számos más reaktortípus létezik, amelyek felsorolására itt most nincs lehetőség. Egy típust azonban még feltétlenül meg kell említeni, mert ez okozta a csernobili reaktorbalesetet. Az **RBMK** egyedi **reaktor**: moderátora grafit, hűtőközege elgőzölgő nagy nyomású könnyűvíz. Az RBMK típus őse a világ legelső erőművi reaktora volt, amelynek első példánya 1954-ben Obnyinszkban állt üzembe. Ebből került kifejlesztésre az 1986. április 26-án szerencsétlenül járt csernobili blokk is. RBMK reaktorok ma már csak a volt Szovjetunió néhány utódállamában működnek.

Külön fejezetet képeznek a hajtóműreaktorok, amelyeket tengeralattjárók és hajók meghajtására fejlesztettek ki. A hagyományos tengeralattjárók (melyek a felszíni közlekedéshez dízelmotort, a víz alatt pedig villanymo-

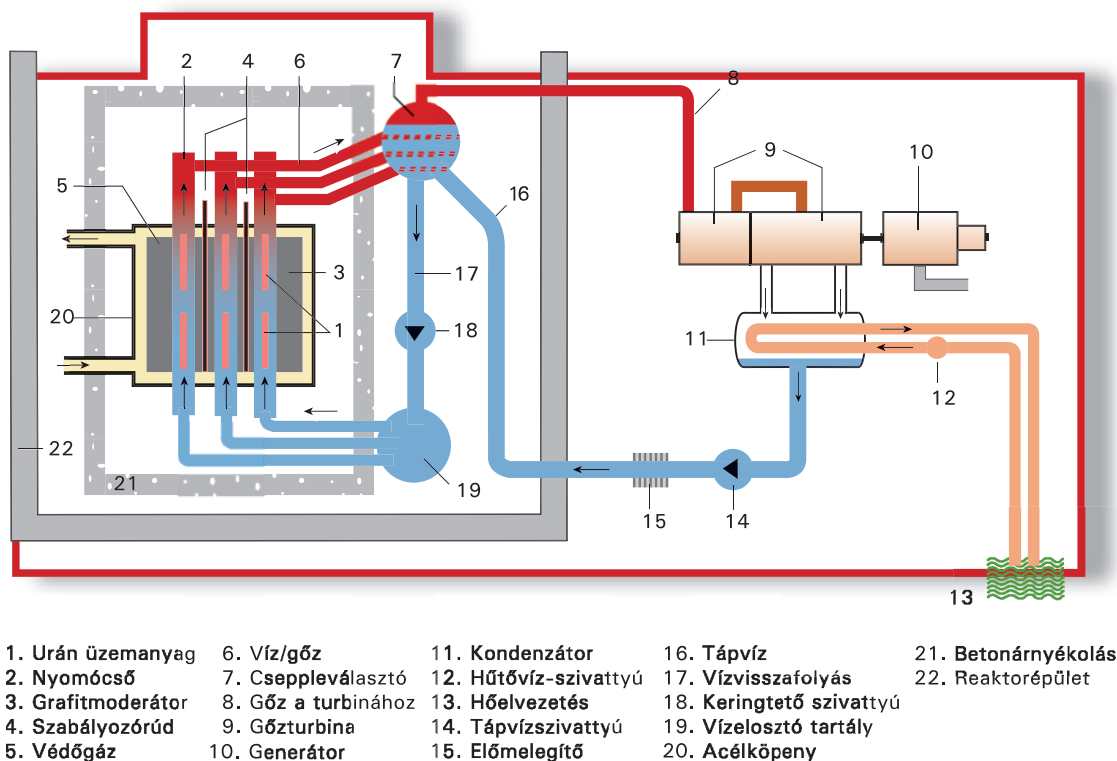
Nyomottvizes reaktorok:

a nyomottvizes reaktorokban az üzemanyag általában alacsony (3–4%) dúsított urán-dioxid, néha urán-plutónium-oxid keverék (ún. MOX). Ez a legelterjedtebb reaktortípus: a világon jelenleg üzemelő atomreaktorok összteljesítményének mintegy 63,8 százalékát adja.

Gyors neutronok:

olyan neutronok, amelyek energiája meghaladja az egy-millió elektronvoltot (MeV).

A csernobili reaktorblokk





A Nautilus, az első atommeghajtású tengeralattjáró, 1954

tort használtak) a második világháború után műszakilag elavultak. Ennek oka, hogy a villanymotorok energiaellátását szolgáló akkumulátorok behatárolták a víz alatti tartózkodás idejét. Többek között ezt a gondot oldotta meg az atommeghajtás.

A reaktorok biztonsága

RBKM-reaktorok:

az RBMK egyedi reaktor: moderátora grafit, hűtőközege elgőzölgő könnyűvíz.

A típus részesedése a világ atomerőművi összkapacitásából 4%. Előnye, hogy nagy teljesítményre képes, a biztonság szempontjából azonban sok kívánnivalót hagy maga után.

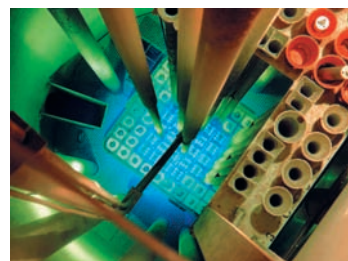
Az atomerőművek biztonságosságára a tervezők nagy figyelmet fordítanak. Egy működő reaktorban az üzemanyagrudak jelentik a legnagyobb sugárveszélyt. Éppen ezért többszörös védelmi rendszert építenek ki, hogy normális működés közben a radioaktív hasadási termékek ne juthassanak ki a szabad levegőre. A hasadóanyag korróziónak ellenálló csövekben (fűtőelem-burkolatban) helyezkedik el. A nyomottvízes reaktoroknál a primer hűtőkör vastag acélfallal van körülvéve. A hűtővíz maga is elnyeli a biológiailag olyan hatásos radioaktív izotópokat, mint a jód. A harmadik biztonsági gát pedig az acélból és betonból készült épület (containment).

A reaktorrendszerek állapotát bonyolult műszerek sokasága figyelni működés közben, készen arra, hogy abnormális körülmények között azonnal leállítsák a reaktort. A tartalék biztonsági rendszer bört adagol a hűtőközegebe, amely azonnal elnyeli a neutronokat és leállítja a láncreakciót. A könnyűvízes reaktorok nagy nyomás alatt működnek. Nagyobb csőtörés esetén a víz elforrna, és a hűtés megszűnne. A reaktormag hűtésének leállása esetén vészűtő-rendszer lép működésbe, amely automatikusan bekapcsol a primer kör nyomásának csökkenése esetén. Abban az esetben, ha gőz jut a zárt reaktorepületbe, azonnal locsolóberendezések indulnak be, amelyek hatására a gőz lecsapódik, és csökken a nyomás az épület belsejében.

Ilyen bonyolult biztonsági rendszer megbízható működtetése csak alkalmas számítógépes rendszer segítségével lehetséges. A számítógépes reaktorirányítás kutatásában hazánkban élen járt a KFKI, majd jogutódja, a KFKI Atomenergia Kutatóintézet, amely a Verona számítógépes rendszer folya-

matos továbbfejlesztésével járul hozzá a Paksi Atomerőmű biztonságos működtetéséhez. Itt meg kell jegyezni, hogy a világon működő több mint 400 atomerőmű között a paksi blokkok az üzembiztonság szempontjából a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség illetékes szervétől igen jó bizonyítványt kaptak.

Az atomreaktorok közel fél évszázados működése alatt három nagy reaktorbaleset történt. 1957-ben az északnyugat-angliai Windscale erőműben, 1979-ben az Egyesült Államokban a Harrisburg melletti Three Mile Island atomerőműnél, valamint 1986-ban Ukrajnában a csernobili erőműnél. Az első két esetben csak anyagi kár keletkezett, míg Csernobilban súlyos katasztrófa történt, amiről részletesen beszámolt a média. Mindhárom esetben súlyos emberi mulasztás vagy gondatlanság okozta a balesetet. Az esetekből az alábbi tanulságok vonhatók le: míg a reaktorok fizikája és a reaktortechnológia ismeretében a biztonságos üzemeltetésnek minden eleme rendelkezésre áll, a leggyengébb láncszem a biztonságosság terén az emberi tényező. Az atomerőművek vezetését csak alaposan képzett szakemberekre lehet bízni, és a gazdaságosságra vonatkozó összes megfontolást meg kell előznie a legteljesebb biztonságra való törekvésnek! Mindent egybevéve: megfelelő gondossággal és felkészültséggel az eddigi három reaktorbaleset mindegyike könnyen elkerülhető lett volna.



Cserenkov-sugárzás a BME oktatóreaktorának aktív zónájában

Összefoglalás: szükség van-e nukleáris energiára?

Az országok fejlettségének egyik jellemzője a felhasznált energia mennyisége; ha úgy tetszik, ez is a civilizáltság mértéke. Minél fejlettebb egy társadalom, annál energiaigényesebb az ipara, annál több műszaki berendezést használ, amelyek szintén energiaigényesek. Vannak szerencsés országok, amelyekben bőven található fosszilis energiaforrás, vízi erő, szél- vagy geotermikus energiaforrás. Minél nagyobb egy ország, annál valószínűbb, hogy több energiaforrás áll rendelkezésére.

A kicsi, és főleg a gyorsan fejlődő országoknak azonban jelenleg nincs más alternatívájuk, mint a nukleáris energia – annak számos előnyével és hátrányával együtt. Az 1. táblázat az atomenergia felhasználásának földrészek szerinti megoszlását ábrázolja. Nem véletlen, hogy ebben a táblázatban az ún. harmadik világ országai nem jeleskednek, valamint hogy Európa messze megelőzi az Egyesült Államokat.

Előszörban a természetes energiaforrásokban szegény és fejlődő kis országok kényszerülnek rá az atomenergia használatára. Igen figyelemreméltó, hogy az Egyesült Államok csak a tizenkilencedik helyet foglalja el a rangsorban. Az Egyesült Államok mind fosszilis, mind pedig egyéb természetes energiaforrásokban bővelkedik, ugyanakkor az is közismert, hogy fejlettségénél fogva a világ legnagyobb energiafelhasználója, ha minden energiafajtát figyelembe veszünk.

Nehézzvízes reaktorok:

ez a reaktortípus nehézvizet (D_2O) használ moderátornak és hűtőközegnek egyaránt. Hátránya, hogy a nehézvíz igen drága, másrészt azonban a legjobb moderátoranyag. Ezért itt az üzemanyag csak alig (1–2 százalékra) dúsított, vagy akár természetes urán is lehet. A nehézvíz forrása nem megengedett, tehát a primer körben a nyomottvízes reaktorokhoz hasonlóan itt is nagy nyomás uralkodik. A nehézvízes reaktorok napjainkban erősen elterjedőben vannak.



1. táblázat. A világon üzemelő atomreaktorok földrészek szerinti eloszlása

Földrész	Reaktorok száma
Európa	212
Ázsia	94
Észak-Amerika	119
Dél-Amerika	3
Afrika	1

A jelenlegi arányok szerint az Egyesült Államokban az energiatermelés 52 százalékát a szén adja, az atomenergia aránya 19,8%, a földgázé 15%, a vízi erőművekből származik 9%, a kőolajból 3%, az egyéb energiaforrások (szélenergia, napenergia stb.) 2 százalékot tesznek ki. Az Egyesült Államoknak óriási szénkészletei vannak – a becslések szerint a jelenlegi kitermelési móddal 250 évre elegendőek a készletek, ha azonban a teljes kitermelhető készletet új módszerekkel hozzák felszínre, a jelenlegi igények mellett akár 1500 évre is lesz elegendő szén. Ilyen körülmények között az alacsonyabb költségek miatt az atomenergia nem kulcskérdés, és az Egyesült Államok-

2. táblázat. A világon üzemelő atomreaktorok országok szerinti eloszlása

Ország	Reaktorok száma	Összkapacitás, megavatt	Részesedés a villamos-energia-termelésből
Franciaország	57	60 313	76,4%
Litvánia	2	2370	73,7%
Belgium	7	5713	56,8%
Szlovákia	6	2448	53,4%
Ukrajna	13	4884	47,3%
Bulgária	6	3538	45,0%
Magyarország	4	1729	42,2%
Dél-Korea	16	12 949	40,7%
Svédország	11	9440	39,0%
Svájc	5	3077	38,2%
Japán	52	43 650	33,8%
Örményország	1	376	33,0%
Németország	19	21 107	30,6%
Finnország	4	2656	32,1%
Spanyolország	9	7289	27,6%
Tajvan	6	4884	23,6%
Egyesült Királyság	33	12 400	21,9%
Csehország	4	1680	20,1%
USA	103	10 799 572	19,8%

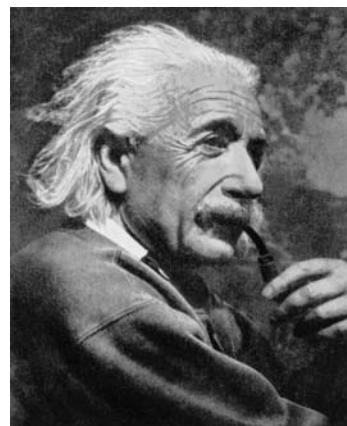
ban az elkövetkezendő évtizedekben a szén megőrzi domináns szerepét az energiaforrások között.

Az 1. és 2. táblázatból kiolvasható, hogy Magyarország jelenleg nem nélkülözheti a nukleáris energiát. Természetesen e kijelentéssel csak saját személyes véleményem fejezem ki. A helyzet elvben gyökeresen megváltozhat ugyan, ha az atomenergiát más, biztonságosabb energiaforrás képes igen rövid határidőn belül, lehetőleg azonnal kiváltani.

Hosszabb távon megoldást jelenthet a deutérium és trícium atommagok egyesítésén alapuló fúziós *energiatermelés*. Ebben minden radioaktív anyag az erőművön belül marad, és a leállítást után 30–40 évvel a berendezés anyagai újrafelhasználhatóvá válnak. Sajnos a szükséges magas (100 millió fok) hőmérséklet miatt a mai kísérletekben még csak a befektetett energiát tudják visszanyerni. Ha a jelenleg előkészítés alatt álló ITER-kísérlet sikeres lesz, akkor az első áramtermelő fúziós reaktor 2040 körül állhat üzembe.

Olcsó dolog lenne azzal példálózni, hogy a lőfegyverek sokkal több ember életét oltották ki, mint az atomenergia-ipar balesetei, mégsem követelték jelentős civil mozgalmak a lőfegyverek gyártásának betiltását. Az is sajnálatos tény, hogy az autó a legveszélyesebb üzem hazánkban, és a halálos esetek száma e téren is aggasztóan nő. Mégsem merült fel az autóközlekedés megtiltása! A statisztikák szerint két-három tizedre a valószínűsége annak, hogy valaki autóbalesetben hal meg. A reaktorok esetében alapvető követelmény, hogy a káros hatások bekövetkezésének valószínűsége nem haladhatja meg a tízmilliomod értéket, azaz a reaktorok a statisztikák tanúsága szerint ezerszer biztonságosabbak, mint a gépkocsik.

Ezek után az előadás címében feltett kérdésre a felvonultatott ismeretek és érvek alapján az a válaszom, hogy nem az atomenergiától kell félni, hanem az emberi felelőtlenségtől, képzetlenségtől és ostobaságtól!



„Két dolog végtelen; a Világegyetem és az emberi hülyeség, de az előbbi nem biztos.”

(EINSTEIN)



Ajánlott irodalom

Bencze Gyula: A német atombomba mítosza. *Természet Világa*, 1991/3: 138.

Bencze Gyula: Az epsilon hadművelet. *Természet Világa*, 1994/5: 211–215.

Bencze Gyula: Heisenberg, a magfizikus. *Magyar Tudomány*, 2001/12: 531.

Eisenbud, Leonard – Garvey, G. T. – Wigner, E. P.: Az atommag szerkezete. Bp.: Akadémiai K., 1969.

Györgyi Géza: Elméleti magfizika. Bp.: Műszaki K., 1961.

Kiss Dezső – Horváth Ákos – Kiss Ádám: Kísérleti atomfizika. Bp.: Eötvös, 1998.

Kiss Dezső – Kajcsos Zsolt: Nukleáris technika. Bp.: Tankönyvkiadó, 1984.

Marx György: Wigner Jenő, a 20. század Euklidesze. *Magyar Tudomány*, 2002/11: 1413.

Muhin, Konstantin Nikiforovic: Kísérleti magfizika. Bp.: Tankönyvkiadó, 1985.

Simonyi Károly: A fizika kultúrtörténete. Bp.: Akadémiai K., 1998⁴.

Szatmáry Zoltán: Bevezetés a reaktorfizikába. Bp.: Akadémiai K., 2000.

Wigner Jenő: Hogyan lettem fizikus? *Magyar Tudomány*, 2002/11: 1408.